

# VALIDACION EXPERIMENTAL DE UN MODELO DE TERMICA DE EDIFICACIONES EN CLIMA TROPICAL HUMEDO \*\*

**María Elena Hobaica \***

(\*) Profesor Asistente del IDEC, FAU, UCV. Directora del IDEC

(\*\*) Resumen del Trabajo de Tesis de Doctorado

## Resumen

El mejoramiento de la calidad de las edificaciones considerando la necesidad de economizar energía, nos condujo al desarrollo de un modelo térmico en régimen variable de temperatura, verificando experimentalmente mediante edificaciones y/o prototipos seleccionados para tal fin.

A partir de este objetivo, orientado hacia la obtención de condiciones de confort en edificaciones concebidas para el trópico húmedo, se obtuvo un modelo capaz de prever variaciones diurnas de temperatura interior. Fueron considerados como parámetros relevantes el asoleamiento y la temperatura exterior por sus efectos sobre la construcción, la capacidad calórica y resistencia térmica de los componentes constitutivos y la tasa de ventilación en climatización pasiva.

Los resultados comparativos indican una correcta aproximación entre los valores calculados por el modelo y los obtenidos experimentalmente, creándose así las bases para un método simplificado de apreciación de la calidad térmica de edificaciones adaptado al trópico venezolano.

## I. INTRODUCCION

El ser humano tiende a crear en su entorno condiciones ambientales apropiadas para el desarrollo de sus actividades fundamentales. Para ello cuenta con medios tales como el diseño de edificaciones lo cual implica una síntesis de consideraciones sociales, económicas, climáticas y tecnológicas a partir de las cuales el hombre es capaz de ejercer cierto control sobre su medio ambiente.

Una de las funciones primordiales de la edificación es moderar las condiciones climáticas exteriores, a fin de proporcionar a sus ocupantes condiciones adecuadas de bienestar.

El conocimiento científico provee la información que garantiza la correcta estructuración de un proyecto en lo que respecta a la ambientación térmica. La inexistencia de modelos que suministren este tipo de información se traduce no solo en edificaciones inconfortables, sino también obliga a gastos de acondicionamiento hoy día inaceptables incluso para países que, como Venezuela, poseen energía a bajos precios.

Un modelo que simule la conducta térmica de edificaciones debe dar a conocer la repercusión de los factores climáticos sobre la edificación y en consecuencia sobre el ambiente interior a través del análisis del comportamiento de la envoltura y estructura interna.

Al adoptarse sistemas físicos sencillos para describir los procesos de transferencia calórica entre los diferentes am-

bientes, el diseñador estará en capacidad de predecir sin mucha dificultad el comportamiento térmico de cada alternativa arquitectónica. Es importante que éste pueda juzgar los fenómenos que intervienen en los ambientes que crea. Mas aún, cuando el progreso de la tecnología constructiva lo confronta a escogencias no tradicionales.

El mantenimiento del equilibrio térmico entre el cuerpo humano y su ambiente es una de las principales exigencias para el confort. Uno de los parámetros fundamentales que interviene en dicho equilibrio es la temperatura del aire interior, la cual puede alcanzar valores muy elevados como resultado de una mala gestión arquitectónica.

Podemos convenir que las exigencias que deben ser satisfechas para el diseño y construcción de edificaciones en climas cálidos húmedos, son las siguientes: protección contra la radiación solar, prevención de la elevación de la temperatura interna durante el día, disminución de la misma durante la tarde y la noche, posibilidades de una ventilación cruzada, permanente y eficaz.

Así, entre las numerosas variables propias de un régimen térmico expuesto a climatización pasiva hemos de considerar aquellas cuya manipulación es decisiva para la obtención de niveles adecuados de "confort térmico":

- La ganancia calórica debido especialmente a la radiación solar incidente.
- La resistencia y la capacidad calórica o de inercia térmica de la edificación.
- La pérdida de calor por la estructura y por ventilación.

El problema de la determinación de dichos parámetros puede facilitarse en gran medida mediante modelos físicos simples. Ello permite evaluar su interacción y efectos sobre las condiciones de temperatura interior en edificaciones expuestas a clima tropical húmedo. En tal sentido es necesario enfatizar sobre la importancia de una correcta utilización de los materiales la cual es decisiva para la obtención de condiciones de confort.

La contrastación de tales modelos por la vía experimental nos permite su verificación instrumental, a la vez que analizamos

el comportamiento térmico de determinadas técnicas constructivas frente a las particularidades de nuestro clima.

## II. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

Partimos de la premisa según la cual en Venezuela es factible, dado el desarrollo de la industria de la construcción, disponer de manera objetiva de recursos y técnicas para diseñar y construir edificaciones cuyo nivel de calidad tienda a elevar igualmente el nivel de vida de sus ocupantes. Ello implica apoyarse en datos certeros físicos y/o económicos para la toma de decisiones de diseño a fin de proporcionar respuestas apropiadas mediante una correcta manipulación de los agentes exteriores (clima, materiales, tecnología existente, hábitos locales etc.), respetando ciertos imperativos que se expresen por normas o estándares. En la medida en que esas soluciones permitan alcanzar el máximo de satisfacción social, mayor será la calidad del producto.

Es por todos conocida la influencia del clima sobre las actividades y la vida del hombre. En tal sentido es fundamental el estudio de los factores precedentes para controlar y minimizar su efecto, de ser este negativo.

Venezuela, país cálido, tropical, cuyo clima puede ser inclemente, ofrece condiciones apropiadas para la creación de reglas de concepción de edificaciones bajo sistemas de climatización pasiva, orientadas hacia la reducción de los aportes excesivos de calor.

Para ello, no solo se requiere el conocimiento de las condiciones climatológicas, sino también se debe tener presente el grado de desarrollo de la industria de la construcción, así como el estado de las investigaciones en el campo de estudio seleccionado.

La calidad de las edificaciones depende de la mayor o menor satisfacción de las aspiraciones y necesidades de los usuarios. La capacidad relativa de la edificación de ofrecer estas condiciones necesarias para la vida humana, se define como "habitabilidad", así, como para referir el nivel de calidad, se utiliza el concepto de "confort".

Las exigencias de habitabilidad son de distinta naturaleza: térmicas, acústicas, de iluminación, durabilidad, seguridad, calidad espacial, etc.

Una de las mayores dificultades que enfrentamos en el estadio actual de nuestros conocimientos es la determinación de rangos de confort aproximados a nuestra realidad. Las escasas tentativas en este sentido tropiezan con una dosis de subjetividad, la cual es inherente a los factores que determinan "el bienestar", por tanto, difícil de generalizar.

No obstante el momento es propicio para el desarrollo de los instrumentos que nos permitan ofertar edificaciones cuyo grado de racionalidad conlleve como objetivo modificar los niveles cualitativos y cuantitativos de la producción.

En efecto, la experiencia venezolana en el desarrollo de materiales, componentes y técnicas de construcción se enfrenta actualmente a nuevos enfoques para inducir una oferta diversificada de componentes constructivos destinados a la producción de edificaciones.

Es así como se plantea la formulación de un programa de investigación y desarrollo, que incida directamente en el proceso de producción de componentes y sistemas, considerando, al mismo tiempo, todos los factores que afectan a dicho proceso. El objetivo fundamental está determinado por la necesidad de que los resultados de la investigación en el campo tecnológico, puedan ser rápidamente asimilados y diseminados por el aparato productivo. Se trata, por otra parte, de abrir posibilidades al desarrollo y puesta en el mercado de nuevos materiales, componentes y técnicas, acordes con la estructura de producción de la industria y a las demandas racionalizadas de los sectores formales e informales de la construcción.<sup>1</sup>

Hasta el momento, pese a los esfuerzos realizados para aumentar la capacidad tecnológica del sector construcción; en el caso específico de las edificaciones, nos hallamos frente a un progresivo deterioro del nivel de calidad. Esta pérdida de la calidad se ha acentuado, inclusive en períodos de expansión y auge de la construcción, llegándose a extremos que los mayores costos son compensados con especificaciones inferiores, mientras los precios de venta aumentan desproporcionadamente. Esta disminución de la

calidad se refleja en múltiples aspectos, siendo el inconfort térmico uno de ellos. Existe, no obstante, la posibilidad de incidir directamente, modificando estas condiciones, por medios relativamente económicos sin que sea estrictamente necesario recurrir a procesos de tipo mecánico.

La selección del ámbito de la térmica como objeto de estudio responde así a una creciente necesidad de subsanar el vacío existente en este campo. En un pasado muy reciente los estudios que tratan las relaciones entre las edificaciones, clima y confort, se consideraban de escaso interés. Vemos como en los casos en que la obra arquitectónica se ha adaptado correctamente a las condiciones climáticas, ello ha correspondido a una visión personal del diseñador, quien con una dosis mayor o menor de subjetividad según el caso, ha introducido principios de diseño térmico provenientes fundamentalmente de su experiencia e interés por el tema.

La posición actual es de una mayor comprensión de la situación, comenzándose a entender la importancia de economizar energía a la vez que mejoramos los niveles de confort, ya que su ausencia afecta las actividades humanas tanto mentales como físicas, incidiendo además en su grado de productividad. Así vemos como cada vez, mayor cantidad de industrias y centros de investigación se plantean como parte del desarrollo de sus capacidades tecnológicas estos aspectos cualitativos relativos al confort térmico, siendo un ejemplo de ello, la oferta en el mercado de componentes constructivos publicitados por sus bondades desde el punto de vista térmico.

Dentro de este marco referencial, la modelización térmica de locales de edificaciones reviste una importancia creciente, en tanto que permite el estudio de la transferencia de calor cíclico entre un sistema térmico y su ambiente circundante.

Diversos modelos permiten describir un hábitat en régimen dinámico de condiciones climáticas. En general se diferencian los modelos detallados de los modelos simplificados.<sup>2</sup> Los modelos detallados buscan una descripción fina de los fenómenos físicos involucrados; los modelos sencillos pretenden ser útiles de trabajo para los diseñadores.

Presentamos al respecto una formulación simplificada basada en la reducción de los aportes calóricos que recibe la edificación. La validación del modelo se efectúa mediante un soporte experimental llevado a cabo en distintas regiones de Venezuela. El resultado es un modelo capaz de predecir la variación periódica de temperatura al interior de edificaciones sometidas a las condiciones del clima cálido tropical.

### **III. ALGUNOS PRINCIPIOS DE DISEÑO TERMICO DE EDIFICACIONES EN REGIONES DE CLIMA CALIDO HUMEDO**

#### **Generalidades sobre el confort.**

La conservación del equilibrio térmico entre el cuerpo humano y el ambiente es una de las exigencias principales de la salud y el bienestar. Las condiciones bajo las cuales este equilibrio se mantiene, exigen la conjunción de numerosos factores entre los cuales están por un lado los factores propios al individuo tales como la actividad, la aclimatación, la vestimenta, etc. y por el otro lado, los factores propios del ambiente tales como temperatura del aire, radiación solar, movimiento del aire y humedad.

El intercambio de calor entre el cuerpo humano y su entorno se produce a través del aire por convección y, directamente entre los cuerpos, por radiación.

Las modalidades de intercambio de calor son regidas por leyes físicas. Sin embargo, están influenciadas por mecanismos fisiológicos mediante los cuales el cuerpo regula las tasas de producción y pérdida de calor, buscando así mantener el equilibrio. Estos mecanismos son la tasa de distribución de la sangre, el metabolismo y la transpiración.

Los procesos de intercambio de calor están bajo la dependencia del clima. La eliminación de calorías se hace por convección sólo si la temperatura ambiente es inferior a la de la piel, pudiéndose acelerar con movimientos de aire fresco. Cuando el organismo está expuesto a la radiación solar, recibe calorías suplementarias. Si está protegido del sol y rodeado de superficies frías, pierde calorías por

irradiación hacia esas superficies. La posibilidad de eliminar calorías por transpiración depende de la humedad del aire.

Es importante no confundir la noción de confort térmico con la de equilibrio térmico. Si bien el equilibrio térmico es esencial para el confort, puede igualmente ser alcanzado bajo condiciones de inconfort por la intervención de mecanismos de termoregulación.

El confort térmico puede definirse de dos maneras: de manera negativa, como un estado que no genera malestar; de manera positiva, como un estado que genera bienestar. Las condiciones para las cuales se experimenta confort térmico definen la zona de confort.

Los autores que han trabajado el tema del confort térmico están de acuerdo en expresar las respuestas del organismo a las exigencias del entorno, mediante un parámetro reductor llamado índice térmico.

Numerosas tentativas han sido efectuadas a fin de establecer índices térmicos referidos a diferentes respuestas fisiológicas y sensoriales. Actualmente existe más de una decena de ellos. Información más detallada sobre el tema se encuentra en la obra publicada en 1980 por MC INTYRE.<sup>3</sup>

Para climas templados los índices térmicos establecidos a partir de los trabajos de FANGER<sup>4</sup> han generado normas en Europa, especialmente en Francia.<sup>5</sup>

Los trabajos de investigadores norteamericanos, en especial los de GAGGE<sup>6</sup>, han establecido índices térmicos aplicables a climas cálidos.

En un estudio realizado por GIVONI<sup>7</sup> se analiza el grado de fiabilidad de cada índice térmico el cual depende de consideraciones tanto objetivas como subjetivas fuera de las cuales el cálculo no es aplicable.

Si bien las reacciones fisiológicas se miden de manera objetiva, la respuesta a estas reacciones varía según cada individuo, e incluso puede variar para cada individuo según diferentes temporadas.

Esto hace que todo estudio sobre confort térmico basado en los efectos de las variables ambientales sobre la sensación de bienestar, se tropiece con consideraciones de tipo subjetivo.

En regiones tropicales, tal como Venezuela, obtener el confort térmico resulta aún mas sutil que en otros climas. En efecto, en climas cálidos húmedos, la sensación de incomfort se debe a la combinación simultánea de la temperatura del aire y paredes, con una fuerte humedad.

La elevada incidencia de la radiación solar, el predominio de una fuerte humedad y el corto salto térmico diurno, son factores que hacen de la ventilación un imperativo en clima tropical húmedo. Ella aumenta el intercambio térmico por evaporación del sudor y contribuye, mediante el enfriamiento de las estructuras y la renovación del aire caliente interior, a reducir la diferencia de temperatura entre el interior y exterior a la sombra.

Esta necesidad imperiosa de aberturas, unida a la poca amplitud exterior diurna de temperatura, sólo hace posible una ligera reducción de la temperatura del aire interior en climatización pasiva, no obstante fundamental, como único medio natural para disminuir el incomfort.

### **Comportamiento térmico y diseño de las edificaciones.**

La sensación de malestar en el interior de edificaciones en clima cálido y húmedo se debe a la acción combinada de: temperaturas elevadas del aire y de los cerramientos, aberturas expuestas a la radiación solar, fuerte humedad. Bajo estas condiciones la temperatura media del aire interior es generalmente mayor que la temperatura media del aire exterior a la sombra. La amplitud de la diferencia depende de una buena o mala gestión de diseño y, en consecuencia, de la manipulación de los parámetros de construcción que afectan el confort.

Se busca que los ambientes interiores cumplan con los siguientes requisitos: protección contra la radiación solar, prevención de aumentos de temperatura durante el día y disminución durante la noche y disponibilidad de una ventilación permanente y eficaz.

La limitación de la influencia de la radiación solar que se transmite a través de aberturas y cerramientos es parte importante del diseño térmico. Se debe ofrecer, por tanto, al diseñador la disponibilidad de cuantificar la ganancia de calor.

Se ha visto que una fracción del calor absorbido durante el día, calienta la masa de muros y techos, mientras que el resto se transmite hacia el interior. Es por ello que el concepto de capacidad calórica o inercia térmica\*, en regiones de radiación intensa y poca fluctuación de la temperatura diurna, puede inducir a la acumulación continua de calor en los espacios interiores.

En las regiones cálidas, las temperaturas superficiales externas son superiores a los valores interiores durante el día, e inferiores durante la noche. Vemos pues la importancia de esta noción de inercia, la cual, además de su efecto cuantitativo de amortiguamiento de la oscilación de la temperatura puede igualmente tener una influencia cualitativa sobre el sentido medio del flujo calórico.

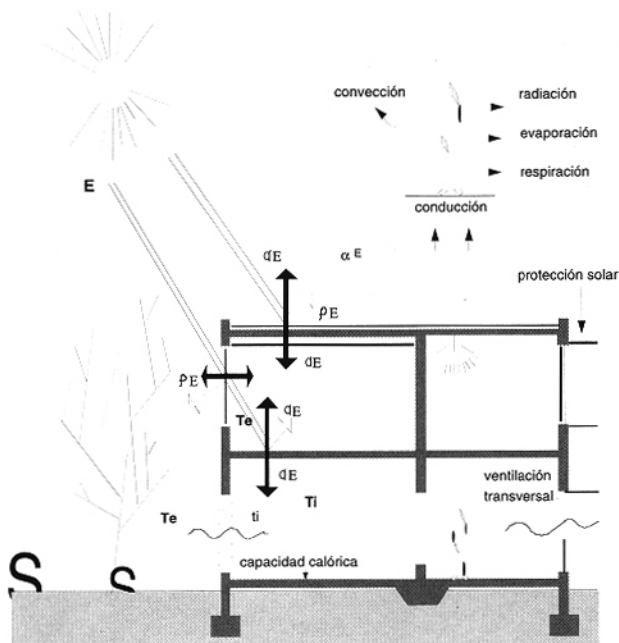
La radiación solar puede igualmente penetrar directamente por las aberturas. Es por ello que estas se deben proteger mediante elementos tales como parasoles, voladillos, verandas, etc.

Un buen rendimiento en la renovación del aire interior es suficiente para acercar las condiciones interiores de temperatura a las exteriores a la sombra. El establecimiento de una ventilación eficaz compensa el reducido margen de maniobra en el establecimiento de la capacidad calórica de los cerramientos, margen originado por la poca amplitud de la variación diurna de la temperatura exterior o poca diferencia de los valores medios de temperatura entre el día y la noche.

La mayor o menor disipación del calor depende del tamaño y distribución de las aberturas, y debe tomar en cuenta igualmente las fluctuaciones de velocidad y dirección del viento.

Se debe, en resumen, combinar la reducción de la ganancia calórica con condiciones adecuadas de ventilación cruzada, esto con el fin de minimizar la diferencia entre las temperaturas del aire dentro y fuera de la edificación. (Gráfico Nº 1)





**Gráfico N° 1**  
**Ganancias calóricas-ventilación**

La definición precisa de los requerimientos para la obtención de las condiciones de confort por medios de climatización pasiva en regiones de clima cálido y húmedo debe ser objeto de un estudio riguroso. La intención del presente trabajo es dotar al proyectista de una herramienta que le permita el dominio al menos de una de las variables importantes: la temperatura.

Para ello hemos desarrollado un modelo analítico cuyo principio exponemos a continuación.

#### IV. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

##### Principios de construcción del modelo. Hipótesis simplificadoras.

La búsqueda de un equilibrio térmico por la disminución de los aportes calóricos debidos al sol, y el aumento de la ventilación se traduce en una aproximación entre las tempe-

raturas interna y externa considerada a la sombra.

Cuando se trata de regiones cálidas, donde el salto térmico no es importante, la manipulación de la masa térmica de la edificación es fundamental ya que la actuación de los cerramientos como masa reguladora térmica no es tan evidente como en los casos en que existen fuertes oscilaciones de temperaturas exteriores entre el día y la noche.

En consecuencia hemos considerado dar a estos tres factores (capacidad térmica, aportes solares y ventilación) un lugar primordial en la definición de un modelo de térmica de edificaciones en clima tropical húmedo. (\*)

El análisis del comportamiento dinámico de los locales de edificaciones se hace indispensable en tanto que buscamos evaluar el efecto de las solicitaciones climáticas desde el punto de vista de su evolución en el tiempo. Si los elementos del modelo se seleccionan correctamente, un sistema de primer orden puede ser suficiente para representar una pared e incorporar por consiguiente el ambiente interior.

Tratamos así, el caso de un volumen único cuya envoltura la conforman cerramientos opacos, acristalados y aberturas; el cual está sometido a dos tipos de solicitaciones: temperatura y asoleamiento.

Para los cálculos admitimos que las curvas de variación diaria son periódicas<sup>8</sup>, es decir idénticas en el transcurso de una secuencia cálida. Consideramos por tanto el caso de oscilaciones sinusoidales correspondientes a un sistema térmico. En este el campo de temperatura es la suma de un campo medio correspondiente a un régimen permanente que obtenemos con fuentes a temperatura constante e igual a su valor medio y de un campo térmico sinusoidal cuya amplitud y fase son independientes del tiempo.

\* La noción de inercia térmica expresa el efecto de transmisión del flujo calórico con reducción de amplitud y desfase en el tiempo por la capacidad de almacenamiento de calor de los cerramientos internos y externos de la edificación. La inercia térmica interviene por tanto como un mecanismo cíclico de carga y descarga en los dos sentidos.

Presentamos un enfoque de resolución analítica del problema, aplicando el principio de superposición. El problema propuesto es lineal y el sistema de ecuaciones asociado, el de un filtro lineal.

Las temperaturas se vinculan por:

- la ecuación de la conducción del calor en los cerramientos.
- el balance energético en el área del local.

### V. ESTRUCTURA DEL MODELO

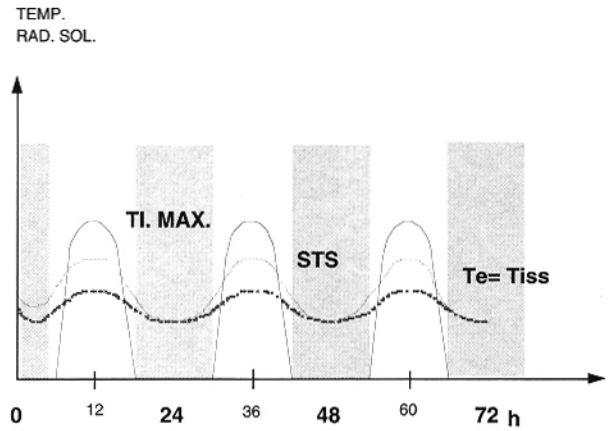
A partir del análisis de un modelo detallado de transferencia térmica a través de muros se demuestra que es posible reducir con realismo el conjunto de fenómenos físicos a elementos que llamaremos "capacitivos" y "resistivos", a los cuales se agregan términos de transferencia ligados a la ventilación.

Una serie de hipótesis simplificadoras clásicas (linearización de los intercambios térmicos por conducción, radiación y convección), nos permiten estudiar por separado los efectos de cada sollicitación sobre la envoltura de la edificación y sobre el ambiente interior, para luego considerar que el efecto global es la suma de las distintas sollicitaciones.

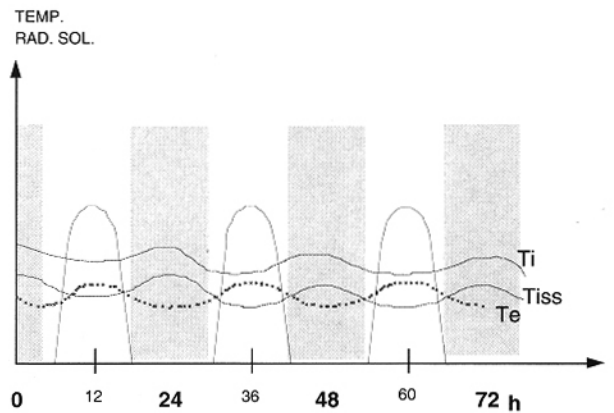
De hecho se considera que la temperatura del local es, la temperatura alcanzada, si suponemos ausencia total de radiación solar mas un suplemento de temperatura que considera exclusivamente los aportes solares. Para cada uno de estos fenómenos la solución al problema es la suma de un término medio que consideramos constante mas un término variable el cual fluctúa alrededor del término medio.

A la curva de temperatura exterior en ausencia de sol le corresponde una curva interior la cual, dada la linearización de las ecuaciones de intercambio térmico, es una senoide de igual período. Seguidamente se considera que el local recibe un asoleamiento periódico por lo que incluimos el intercambio térmico correspondiente, cuyas ecuaciones son igualmente lineales y de coeficientes constantes.

### FENOMENOS DINAMICOS DEL MODELO



### EDIFICACION UNICAMENTE RESISTIVA



### EDIFICACION RESISTIVA- CAPACITIVA

Gráfico Nº 2

Fenómenos dinámicos del modelo

Los términos medios comprenden los factores de asoleamiento y de ventilación, a partir de los cuales es posible obtener la temperatura media del aire interior. El término fluctuante considera los intercambios por conducción a través de los cerramientos en régimen variable de temperatura y es afectado por los términos medios. (Gráfico Nº 2 y 2A )

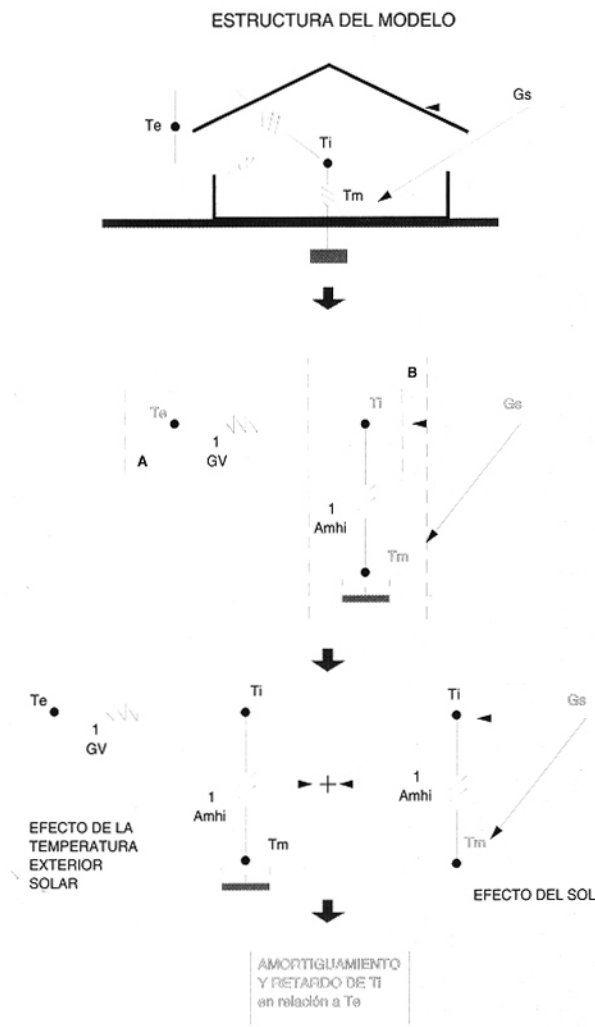


Gráfico N° 2 A

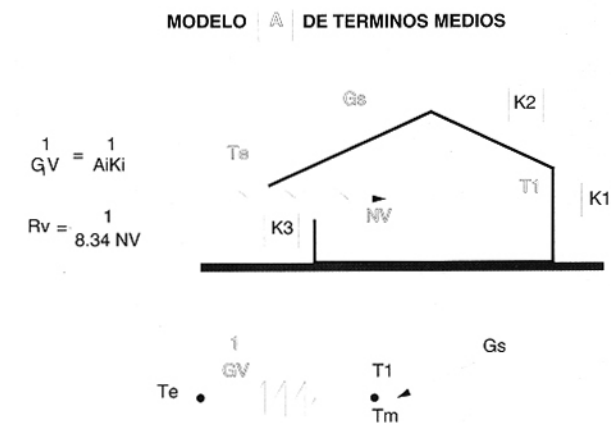


Gráfico N° 3

**Modelo A de Términos Medios (Gráfico N° 3)**

**• Estudio de efectos solares y de ventilación.**

Se admite que en ausencia de radiación solar la temperatura media interior es igual a la temperatura media exterior. para  $G_s = 0$   $T_{i \text{ med}} = T_{e \text{ med}}$

Luego se considera como si la temperatura del aire exterior fuese nula ( $T_e = 0$ ). El balance para régimen permanente se escribe:  $G_v \cdot (O - STS) + G_s = 0$

El suplemento medio de temperatura debido al sol (STS med) es el resultado de la relación entre los aportes solares medios por volumen ( $G_s$ ) y las pérdidas medias por volumen de local. ( $G_v$ ).

$$STS \text{ med} = \frac{G_s \text{ med}}{G_v \text{ med}}$$

sabiendo que:  $G_s \text{ med} = \sum Ri \cdot fi \cdot FSi \cdot Ai / \text{volumen} \text{ (W/M}^3 \text{)}^9$

$Ri$  (W/m<sup>2</sup>): Radiación solar media incidente recibida por cada cerramiento durante el período considerado.

$fi$  (sin dimensión): coeficiente de asoleamiento que traduce la reducción de energía solar recibida por una pared vertical debido a la presencia de protecciones.

$FSi$  (sin dimensión): factor de transmisión solar de cada cerramiento. Relación entre el flujo de calor transferido y la radiación solar incidente.

$Ai$  (M<sup>2</sup>): Area de cada cerramiento.

y que  $G_v \text{ med} = G_1 + 0,34 \cdot N \text{ (W / m}^3 \text{)}$

$G_1 = Ki \cdot Ai / \text{volumen} \text{ (W / M}^3 \text{)}$  (coeficiente volumétrico de pérdidas térmicas por transmisión a través de los cerramientos)

$Ki$  (W/M<sup>2</sup> C): coeficiente de transmisión de cada cerramiento i.

$Ai$  (m<sup>2</sup>): área interna de cada elemento de cerramiento.

$N$ : tasa horaria de renovación de aire.